文章编号：1007-4627(2024) 01-0001-08

CNPC2023 通过 4-α 衰变观测 ^{16}O 中可能的玻色凝聚态

陈家豪[1]，叶沿林[1]，马凯[1]，韩家兴[1]，王东玺[1]，林承键[2,3]，贾会明[2]，杨磊[2]，李根[1]，阳黎升[1]，胡梓瑶[1]，谭智威[1]，魏康[1]，蒲伟良[1]，陈莹[1]，楼建玲[1]，杨晓菲[1]，李奇特[1]，杨再宏[1]，骆天鹏[2]，黄大湖[2,3]，钟善豪[2,3]，李智焕[1]，许金艳[1]

(1. 北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室，北京 100871；
2. 中国原子能科学研究院核物理研究所，北京 102413；
3. 广西师范大学物理科学与技术学院，广西桂林 541004)

摘要：近期在中国原子能科学研究院北京串列加速器核物理国家实验室开展的 ^{16}O + ^{12}C 非弹散射实验，给出了 ^{16}O 中存在 4-α 玻色凝聚状态的新证据。实验采用多套双面硅微条带电粒子望远镜，首次在 ^{16}O 衰变中实现了 4 个 α 粒子的准确识别 (Particle Identification, PID) 和符合测量。在此基础上获得了高分辨的反应 Q 值谱并重建了清晰的 4-α 共振态。其中在阈值附近观察到 4 个高显著度 (大部分高于 5σ) 的共振态，它们按照 ^{12}C(Hoyle state) + α 的特征模式衰变，与理论预言的类 Hoyle-BEC 结构及其转动带特征相一致。本观测结果将推动进一步的理论研究，实验上也需要对上述共振态做更多物理量的观测。

关键词：集团结构；类 Hoyle 态；^{16}O 的共振态；高激发
中图分类号：O571.21 **文献标志码：**A **DOI：**10.11804/NuclPhysRev.31.01.01

1 引言

原子核中的集团结构是在原子核低密度区普遍出现的奇特状态，近年来一直是核物理与核天体物理领域的重点关注的问题之一[1-6]。按照 Ikeda 图，在原子核破裂阈值附近一般会出现与其相对应的集团结构态[7]。随着激发能的提高，可以出现多 α 结构直至最高阶的全 α 结构。如果所有 α 粒子均处于最低的 S 波，且体系的整体空间分布扩展，则原本以费米子（核子）独立运动为基础的核体系可转化为以玻色子运动为基础的玻色-爱因斯坦凝聚 (Bose-Einstein condensation, BEC) 状态[8]。这种演化对核物质形态和核天体过程有重要影响。

此前的实验和理论研究基本确认，天体演化过程中影响巨大的 ^{12}C 的 Hoyle 态（7.65 MeV, 0_2^+）是一个由 3-α 组成的类 BEC 态[9-13]。Hoyle 态主要通过 $\alpha + {}^8$Be→3α 进行衰变[14]。比 ^{12}C 更重的体系里，如 ^{16}O、^{20}Ne、^{24}Mg 等，尽管已有多种理论预言，但由于实验直接测量多个 α 且判断它们所处状态确实很困难，这种状态是否存在迄今依然缺乏可靠的实验证据[15-16]。

对于 ^{16}O，理论上指出，其 4-α 分离阈（14.437 MeV）附近可能出现与 Hoyle 态类似的 4-α 凝聚态。当然，不同的理论模型计算得到的能级位置不尽相同[12,17-18]。理论上预言的 4-α 凝聚态与 ^{12}C(0_2^+) + α 的构型有较大的重叠，并且主要通过两步过程 ^{16}O → ^{12}C(0_2^+) + α → 4α 衰变[19-20]。一般认为阈上的第一个 4-α 凝聚态与单举实验观测到的 15.1 MeV 的 ^{16}O 的激发态相对应[18,21-23]。然而至今为止，依然无法对 ^{16}O 的 15.1 MeV 态做可靠的的集团衰变测量[15,20,24-25]。这主要是由于在非常靠近分离阈的能区，α 粒子很难穿出库伦位垒[20]。以往实验观测到的一些迹象，很可能只是本底的统计涨落[20,24]。

为此，对 ^{16}O 的 4-α 衰变的实验测量，需要针对比 15.1 MeV 更高的激发态。自 1967 年以来，已经有一些实验关注了 ^{16}O 的多 α 衰变。这些实验可分为共振散射实验[26-28] 和破裂反应实验[15,29-31]。通常共振散射实验可选用气体厚靶，可通过调整束流能量选择激发能区。一般使用 ^{12}C 和气体 ^{4}He 反应，测量末态多 α 来重建得到共振 ^{16}O 的能谱。但由于其不可避免地会引入非共振的成份，且反应点较难确定，通常这类反应本底较高，能量分辨相对较差，不同实验的结果经常不一致。破裂反应通常为两步过程，即首先通过弹靶反应获得激发的目标核，然后目标核衰变为 4-α。此时可以主要通过衰变产物

收稿日期：2024-02-06； 修改日期：2024-02-06
基金项目：国家重点研发计划项目 (2023YFA1606403, 2023YFE0101600、2022YFA1602302)；国家自然科学基金（12235020、12027809、11961141003、U1967201、U2167204)；国家财政部稳定支持研究经费（WDJC-2019–13)；领创科研项目（LC192209000701、LC202309000201）
作者简介：陈家豪（1995–），男，河南焦作人，博士研究生，从事粒子物理与原子核物理研究；E-mail: jiahaochen@pku.edu.cn
通信作者：E-mail: yeyl@pku.edu.cn

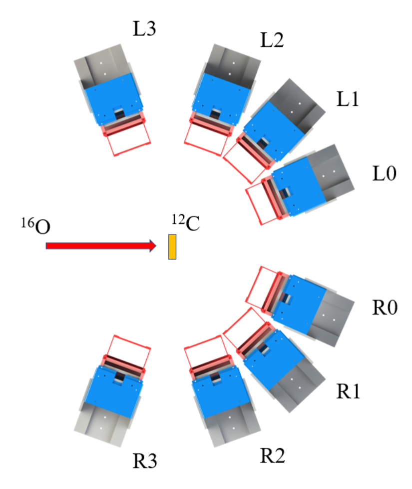


图 1 (在线彩图) 探测阵列示意图

推出反应 Q 值并重建母核的激发能, 而 Q 值和激发能谱的分辨率依赖于反应末态碎片的识别和测量。上面提到的几个破裂反应实验均通过探测的粒子数 (hits)[15,29-31] 及其能量来推出反应 Q 值和激发能。这种没有粒子鉴别 (particle identification, PID) 的方式会引入较大的本底, 也会影响对反应道的判断与筛选。

本文将主要介绍为了寻找 ^{16}O 中的类 Hoyle 态而在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上开展的非弹激发和衰变实验及其数据处理主要过程。本次实验尽可能多的通过有粒子鉴别的多个 α 来分析反应机制以及重建 ^{16}O 共振态[32]。

2 实验设置

由于本次实验的物理目标是对末态产物进行多重符合探测, 同时为了获得尽可能高的能量、位置分辨, 本次实验采用八套硅微条探测器组成的望远镜系统对反应末态粒子进行探测, 如图1所示。其中 T0 和 T1 望远镜（L0、R0、L1、R1）由三层硅探测器组成, 其中第一层为厚约 40 μm 的 W1 型硅微条探测器, 其有效探测面积为 50 mm × 50 mm, 正背面分别分割为 16 条独立读出; 第二层为厚约 500 μm 的 BB7 型硅微条探测器, 其有效探测面积为 64 mm × 64 mm, 正背面分别分割为 32 条独立读出; 最后一层为厚约 1500 μm 的 MSX40 型大面积硅探测器, 其有效探测面积为 64 mm × 64 mm。T2（L2、R2）、T3（L3、R3）望远镜均由两层硅探测器组成。T2 由一层约 40 μm 的 W1 型硅微条探测器和一块 1500 μm 的大面积硅探测器组成, T3 由一层约 40 μm 的 BB7 型硅微条探测器和一块 1500 μm 的大面积硅探测器组成。关于探测器阵列更详细的信息可以参考[32]。

实验中, ^{16}O 轰击 0.98 μm 的 ^{12}C 靶, 非弹激发 ^{16}O 至 4-α 分离阈之上. 随后, 这些高激发态其可通过不同的路径衰变为 4 个 α 粒子。α 粒子及反冲核 ^{12}C 可被望远镜系统探测。通过带电粒子在两层硅中沉积能量的关系即 $\Delta E - E$ 方法来做粒子鉴别 (PID)。由于 PID 曲线的位置依赖于第一层硅的厚度, 而实际使用的第一层 W1 型硅微条的厚度不均匀性较大, 因此使用逐格点的方式做 PID 分析。作为举例, L0 望远镜的前两层硅单格点的 PID 如图2所示。

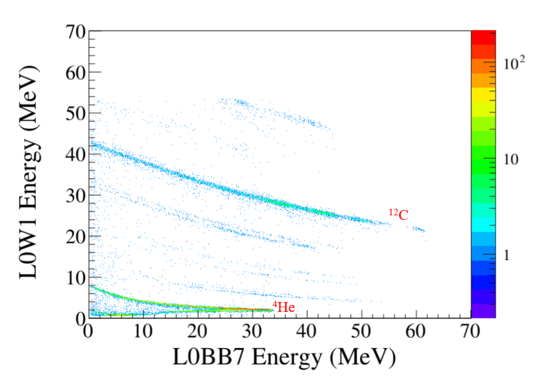


图 2 (在线彩图) L0 望远镜的前两层硅单格点的 PID 图

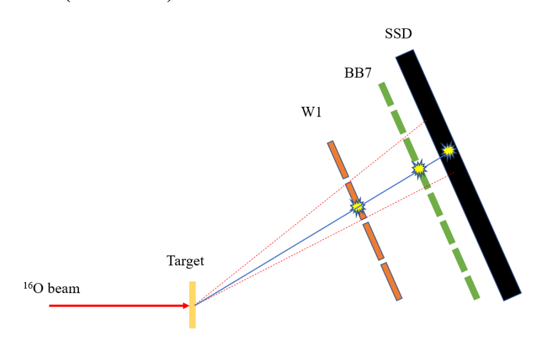
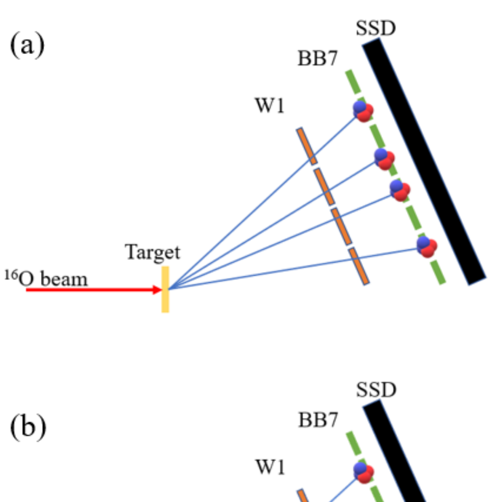


图 3 (在线彩图) 粒子径迹筛选示意图

尽管本次实验探测避开了零度附近很强的直接束流粒子的影响, 仍然可能有少量粒子来自在硅探测器本身发生的核反应。为了尽可能避免这种本底影响, 我们通过粒子在两层硅中记录到的位置信息重建其径迹。若径迹无法回推至靶范围, 则排除对应的事件。这种方法的示意如图3。另外也加入各探测信号的时间关联约束, 以尽可能的排除偶然符合事件。

如前所述, 本次实验特别关注对于 α 粒子的鉴别。首先, 我们选取反应末态中 4 个 α 都有粒子鉴别（4-α 全 PID）的事件, 如图4(a) 所示。此时, 假定反冲核为 ^{12}C, 利用束流的能动量和探测到的 4 个 α 粒子的能动量, 可按照能动量守恒关系推出 ^{12}C 的能动量[32-34]。假定反冲核为 ^{12}C 的正确性, 可由下一节中提到的 Q 值谱中的对应的峰来检验。为了增加好事件的统计量, 可以增加一部分 α 粒子阻停在第一层硅探测器从而缺乏 PID 的事件。例如, 4 个 α 中只有 3 个穿透望远镜第一层硅从而有 PID, 而第 4 个 α 的能量不足以穿透第一层硅从而没有 PID。此时为了尽可能减少由于粒子误判而引入的本底, 可增加对反冲 ^{12}C 的测量和判断, 即要求事件



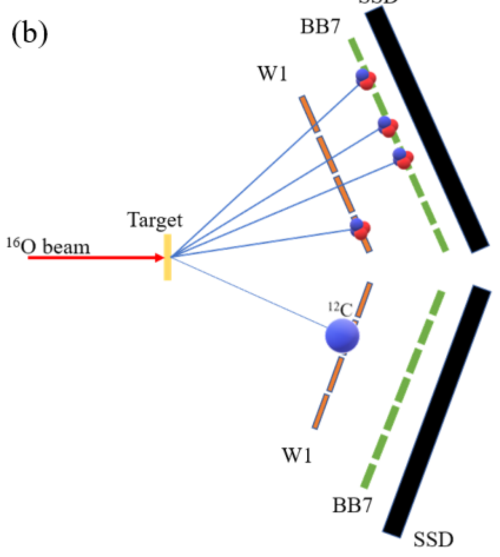


图 4　(在线彩图) 反应末态粒子示意图。(a) 反应末态 4 个 α 均有粒子鉴别；(b) 反应末态中有的 α 粒子没有粒子鉴别，但测到了 5 个“hit”，可用于辅助识别所有末态粒子（见正文）。

含有第 5 个“hit”(5-“hit”事件)，如图4(b) 所示。由于 ^{12}C 很难穿透第一层硅，此时就有两个缺乏 PID 的粒子。我们首先要求第 4 个“hit”的被测得的能量小于 α 粒子在第一层硅中的穿透能（约为 9~10 MeV）。然后要求探测到的第 5 个“hit”的能量 [$T_{\rm det}$(^{12}C)]，与按照能动量守恒由束流和其余 4 个“hit”的能动量推得的反冲 ^{12}C 的动能 [$T_{\rm cal}$(^{12}C)] 相一致，也就是选取对应于图5中的红线区域内的事件。满足这种限制的 5-“hit”事件同样能够产生干净的 Q 值峰（见后分析），选取这个峰也就保障了假定的 PID 等效于正确的 PID。这部分增加的事件和 4-α 全 PID 的事件统称为“加和好事件”，它们被用于接下来的物理过程分析。

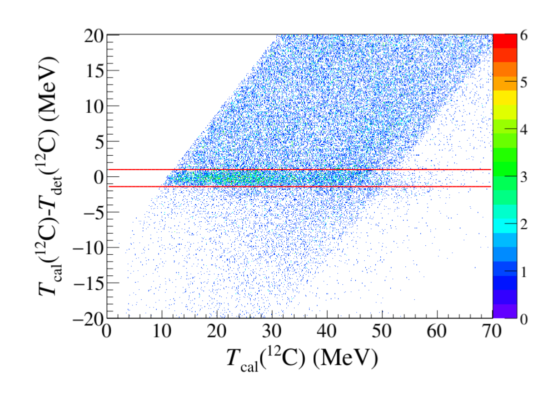


图 5　(在线彩图) 利用未完全识别的 4 个“α”粒子的能动量和束流的能动量推得的反冲 ^{12}C 的能量 $T_{\rm cal}$(^{12}C) 与实际探测到的第 5 个“hit”能量 $T_{\rm det}$(^{12}C) 之间的关系。

3　数据分析及结果

反应 Q 值是反应前后的质量差，也是反应末态粒子的总动能与初态束流能量的差值，可表达为：

$$Q=\sum_{i=1}^{4}E_{\alpha_i}+E_{^{12}\rm C}-E_{\rm beam} \tag{1}$$

图6展示了我们本次得到的结果与 Freer 等人得到的结果[29] 的对比。其中位于-14.4 MeV 左右的峰，对应于末态粒子为 4 个 α 加上反冲的 ^{12}C。其他任何 5 粒子以上的末态质量组合均远离这个峰，说明这个 Q 值峰在没有本底干扰情况下等价于 4α + ^{12}C 的完整的 PID。位于大约-18.9 MeV 的峰也对应于同样的 5 个末态核，只不过 ^{12}C 处于 4.44MeV 的激发态。可以看到本次实验的“加和好事件”对应的 Q 值峰非常清晰，基本没有本底。考虑到本底会比较集中的出现在 4-α 分离阈附近，保持 Q 值峰的低本底对于重建阈值附近的共振态特别重要。

通常多 α 构成的共振态的衰变模式，主要不是所有 α 成员同时崩开，而是多步过程。对于 ^{16}O, 通常是 ^{16}O(excited) → ^{12}C(excited) + α → 4α 或者 ^{16}O(excited) → ^{8}Be + ^{8}Be → 4α。此时可通过遍举方法选择其中 2 个或 3 个 α，按照不变质量 (Invariant mass, IM) 方法来寻找母体共振态，如示意图7所示。用本实验的“加和好事件”中的 3-α 或 2-α 粒子重建的能谱举例如图8所示。图中明显给出已知的 ^{12}C 的 7.65 MeV 和 9.64 MeV 共振态以及 ^{8}Be 基态，这些峰的宽度和位置反映了本次实验探测良好的分辨率以及数据分析处理的可靠性。

随后我们选择任意 3-α 能够组合出 ^{12}C 的 7.65 MeV 激发态 (Hoyle state) 的事件，同时选择图6(b) 中在-14.44 MeV 附近的峰。此时反应末态产物为 ^{12}C(Hoyle state → 3α)、剩余的第四个 α 粒子以及反冲的基态 ^{12}C。此时第 4 个 α 可以与 ^{12}C(Hoyle state) 组合，重建出弹核 ^{16}O$_{\rm P}$ 被非弹激发后的共振态；当然也可与反冲的基态 ^{12}C 结合，重

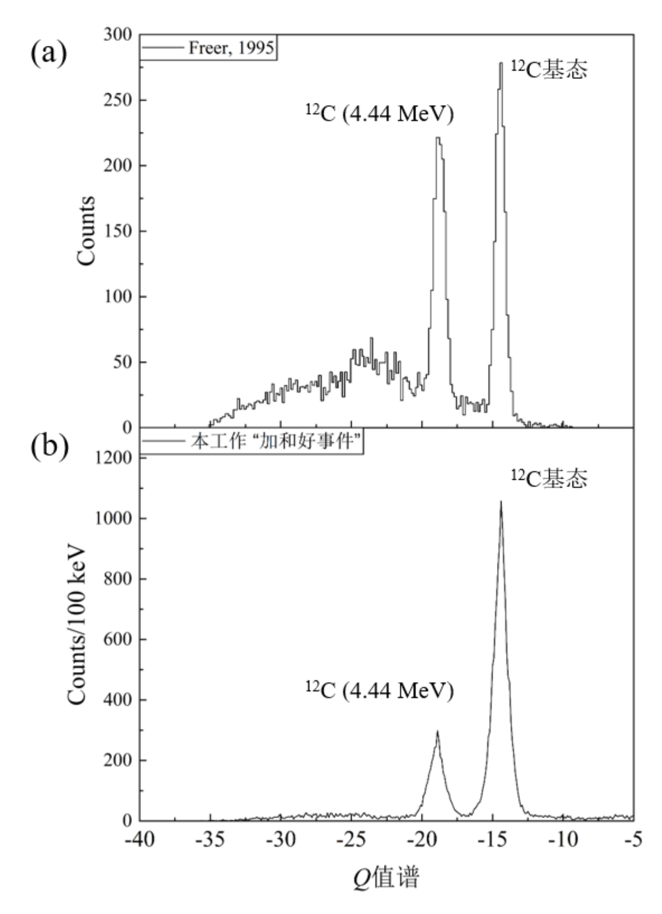


图 6　(在线彩图) Q 值谱:(a) Freer 等人早前实验的结果[29]; (b) 对应本实验"加和好事件"的结果

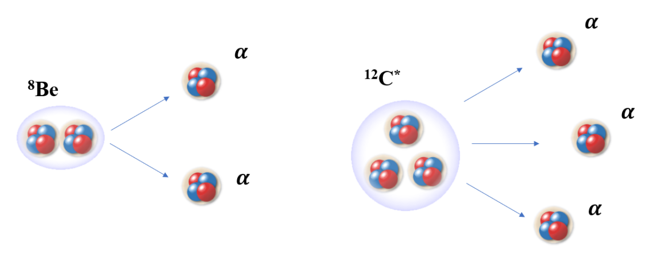


图 7　(在线彩图) ^{8}Be 基态和 ^{12}C 激发态衰变为多 α 的示意图

建出靶核 ^{12}C 接收了一个转移来的 α 形成的类靶 $^{16}O_T$。显然，前一种过程是我们期待研究的 4-α 衰变物理过程，而后一种是本底过程。由于转移反应的截面可以很大，因此后一种干扰的本底过程可以概率（截面）很大。由于末态粒子相同，这两种过程无法通过 Q 值谱区分，但可以通过 Dalitz 图分析[29,35-36]，如图9所示。图中横向很强的带子，对应于已知的 $^{16}O_T\sim 12$ MeV 的激发态。

为了避免 $^{16}O_T$ 的影响，选择 $^{16}O_T > 12$ MeV（图9中红线以上部分）的数据，此时投影到 $^{16}O_P$ 的不变质量谱如图 10所示。图中同时展示了利用蒙特卡洛模拟得到的效率曲线。可以看到仅由 4-α PID 事件重建出的能谱效率在 19 MeV 附近接近于 0，正是由于 5-"hit" 事件的加入，改进了阈值附近的探测效率分布，使得关键的共振态得以被观测到。其他衰变道（如经过 ^{8}Be + ^{8}Be 衰变）或 Q 值位于-18.88 MeV 附近（反冲 12C 被激发）的数据可以按照类似的方法进行处理，考虑到与本文所要讨论的 ^{16}O 类 Hoyle 共振态关系不大，所以在此没有给出。

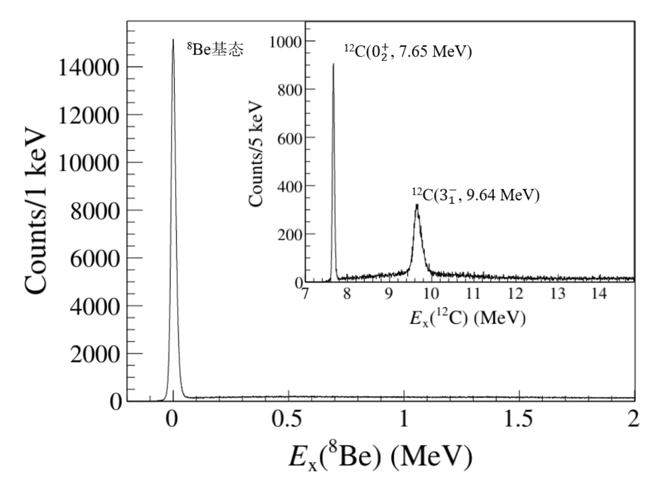


图 8　(在线彩图) 选择"加和好事件"中的 2-α 和 3-α 粒子重建得到的 ^{8}Be 的激发能谱及 ^{12}C 的激发能谱

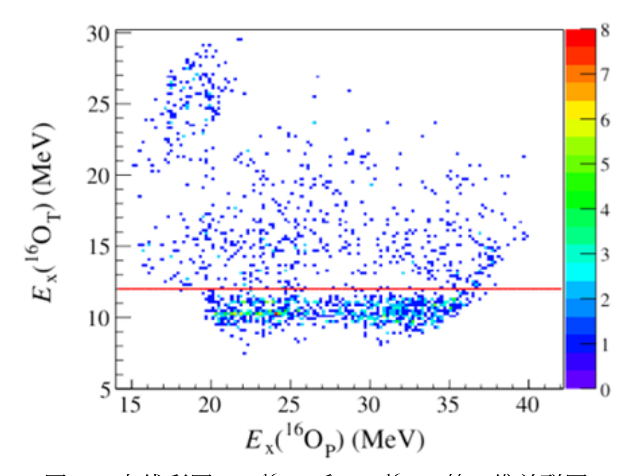


图 9　(在线彩图) $E_x(^{16}O_P)$ 和 $E_x(^{16}O_T)$ 的二维关联图

4　讨论

从图10中可清晰地看到 4-α 破裂阈值附近有 5 个窄共振峰。考虑到近阈能区库伦位垒的阻挡，这几个峰的出现更加突出反应了 ^{16}O 中对应的 4-α 结构。利用卷积了探测分辨的 Breit-Wigner 函数描述每个峰，对能谱进行拟合，结果如表1所示。其中峰显著度水平（significance level，SL）是通过最大似然法分析获得[37]，也就是比较加入该峰（L_{H1}）或者不加入该峰（L_{H0}）时拟合得到的最大似然函数值的差别。结果显示，位于 16.18、17.46、18.47、19.74 MeV 的 4 个峰的显著度很高，特别是后 3 个峰显著度大于 5σ。而位于的 15.63 MeV 的峰受限于较低的统计量，其显著度较低，需要后续实验进一步确认

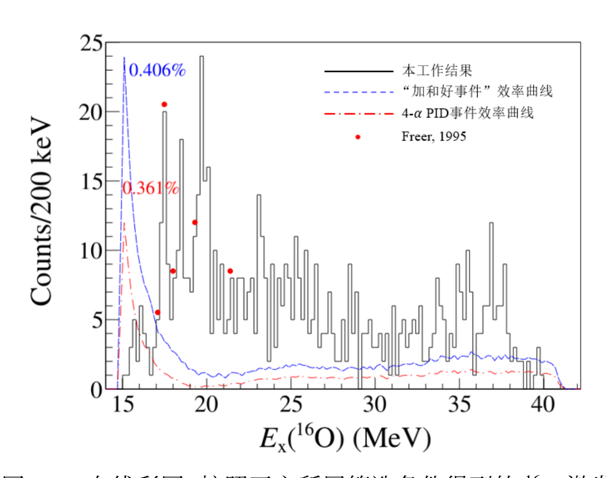


图 10　(在线彩图) 按照正文所属筛选条件得到的 ^{16}O 激发能谱。蓝色虚线为模拟得到的“加和好事件”的效率曲线，红色点划线为模拟得到的 4-α 全 PID 事件的效率曲线。Freer 等人的初步结果也用红点标在了图中[29]

和研究。

表 1　拟合得到的 5 个共振态的信息，括号中表示拟合得到的统计误差 (1.s.d)

E_x (MeV)	Γ (keV)	SL (σ)
15.63(5)	271(200)	2.7
16.18(6)	274(140)	3.0
17.46(4)	370(100)	6.5
18.47(5)	421(140)	5.1
19.74(5)	668(250)	>8.0

图11显示了本次实验结果与以往衰变实验得到的结果的比较。可以看出本工作中得到的近阈共振峰结构清晰且显著度高，而此前的结果受本底干扰很大难以确认共振峰的存在。这主要是由于此前的测量均缺少对衰变的多个 α 的识别 (PID) 以及对本底干扰反应道的有效排除[15,29,31]。即本实验首次高显著度地发现了 4 个 ^{16}O 中的 4-α 共振峰，它们通过 ^{12}C(Hoyle state) + α 的特征路径衰变。这个衰变道本身从实验角度体现了与 ^{16}O 的类 BEC 态的密切关系。首先，动力学分析表明，如果 ^{16}O 处于类 BEC 态，它将优先通过 ^{12}C(Hoyle state) + α 的模式衰变[19]。这一方面是由于库伦位垒效应 (单个 α 穿出位垒相对容易)，另一方面也是由于衰变过程倾向于尽可能保留母核结构 (structural link)[38-40]。由于 ^{12}C(Hoyle state) 是 BEC 型结构主导，所以 ^{16}O 的类 BEC 态会优先衰变到 ^{12}C(Hoyle state) + α。在这里 ^{12}C(Hoyle state) 里边的 3 个 α 已经处于 S 波，因此只需要考虑第四个 α 所处的轨道即可。

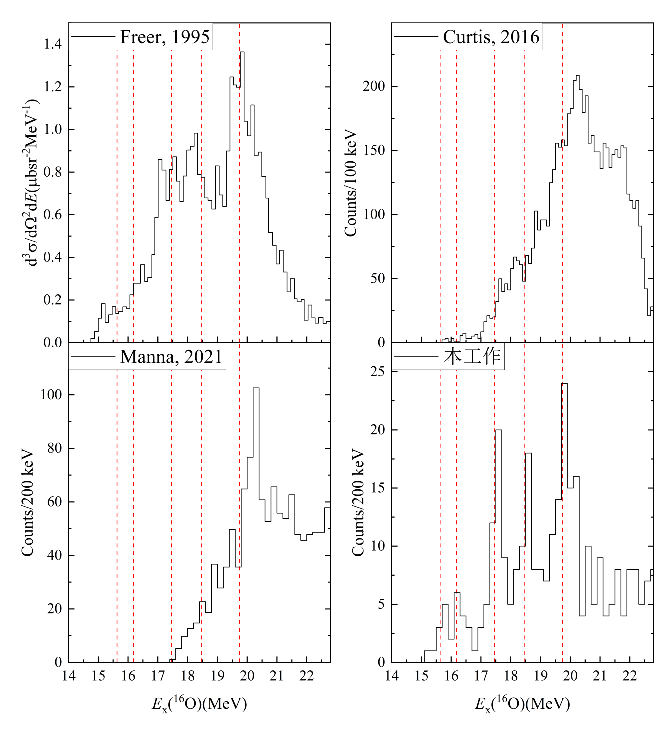


图 11　(在线彩图) 本工作和以往的衰变实验 Freer 1995[29]、Curtis 2016[31]、Manna 2021[15] 得到的 ^{16}O 激发能谱的对比，图中红色虚线标出了表1中列出的共振态的峰位

理论上，Ohkubo 等人通过耦合道方法完整地研究了 ^{12}C + α 散射体系可以产生的 ^{16}O 共振态，预言了一条由 ^{12}C(Hoyle state) + α 体系形成的转动带，它的 0^+、2^+、4^+、6^+ 成员分别处于 16.61、17.04、18.38、19.95 MeV[41]。这与本次实验得到的四个共振峰的位置极为接近。尽管本次实验中受限于统计无法通过角关联的方式测得这些态的自旋宇称，但它们通过 Hoyle 态的特征衰变模式已经显示其和理论预言的类 Hoyle 态紧密关联。对于这个转动带的每个成员，其内在的 3 个 α 已经处于 S 轨道，只有第 4 个 α 可具有不同角动量，其中很可能包含了第 4 个 α 也处于 S 轨道的情况，也就是类似 ^{16}O 的 BEC 态。Funaki 等人通过计算也给出相似的结果，即在 4-α 分离阈之上得到一条转动带，其带头 (0^+ 态) 相当于第 4 个 α 粒子掉入了 Hoyle 态中[42]。这种关系如图12所示。当然，也有其他理论工作认为靠近 4-α 分离阈的地方会出现若干个 0^+ 态 (而不一定是转动带)，它们都与 BEC 结构有关[43]。显然，本次测量结果将激发进一步的理论研究，实验上也需要进一步观测表1中几个共振态的自旋宇称。

5　总结

通过八套基于硅微条探测器的望远镜系统，测量了 ^{16}O 在 ^{12}C 靶上的非弹激发及 4-α 衰变过程，首次得到了大量的有全部 4 个 α 粒子鉴别的事件。为了有效使用部

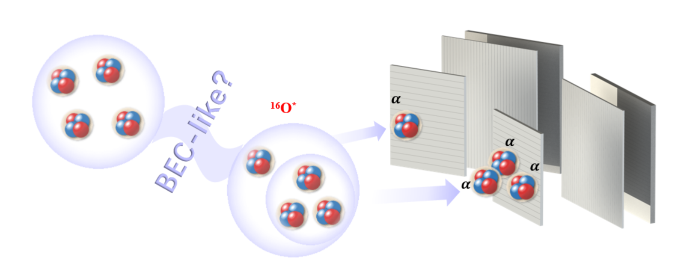


图 12 (在线彩图) 实验探测及由 4-α 重建的物理过程示意图

分无完全 α 粒子鉴别的事件，加入了对第 5 个粒子“hit”的筛选，使其符合反冲 ^{12}C 的性质，从而使得具有清晰 Q-值分辨（等效于末态全粒子鉴别）的好事件数增加了约一倍，特别是改善 4-α 分离阈附近的探测效率。通过对这种“加和好事件”的分析，高显著度地观测到 ^{16}O 中在 4-α 分离阈附近的四个共振态，它们按照 ^{12}C(Hoyle state) + $\alpha \rightarrow 4\alpha$ 的方式衰变。由于 ^{12}C(Hoyle state) 已经是类 BEC 结构，且第四个衰变 α 的构成也与理论预言的包含 S 轨道的态相一致，本实验为 ^{16}O 中出现类 BEC 态提供了重要的实验证据。后续需要实验进一步直接确定目前所观察到的这几个共振态的自旋宇称，也需要理论模型分析这几个共振态的内在结构及其衰变路径和宽度。

参考文献

[1] von Oertzen W, FREER M, KANADA-EN’YO Y. Phys Rep, 432.

[2] HORIUCHI H, IKEDA K, KATō K. Prog Theor Phys Suppl, 2012, 192: 1. DOI: 10.1143/PTPS.192.1.

[3] LIU Y, YE Y L. Nucl Sci Tech, 2018, 29(12): 1. DOI: https://doi.org/10.1007/s41365-018-0522-x.

[4] YE Y, YANG X, LIU Y, et al. SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica Astronomica, 2020, 50(11): 112003. DOI: 10.1360/SSPMA-2020-0282.

[5] YANG Z H, YE Y L, ZHOU B, et al. Phys Rev Lett, 2023, 131: 242501. https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.131.242501.

[6] HAN J, YE Y, LOU J, et al. Communications Physics, 2023, 6(1): 220. https://doi.org/10.1038/s42005-023-01342-6.

[7] IKEDA K, TAKIGAWA N, HORIUCHI H. Prog Theor Phys Suppl, 1968, E68: 464.

[8] ADACHI S, FUJIKAWA Y, KAWABATA T, et al. Phys Lett B, 2021, 819: 136411. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physletb.2021.136411.

[9] TOHSAKI A, HORIUCHI H, SCHUCK P, et al. Phys Rev Lett, 2001, 87: 192501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.192501.

[10] YAMADA T, SCHUCK P. The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei, 2005, 26(2): 185.

[11] FUNAKI Y, HORIUCHI H, VON OERTZEN W, et al. Phys Rev C, 2009, 80: 064326.

[12] KANADA-EN’YO Y. Phys Rev C, 2014, 89: 024302.

[13] FUNAKI Y, HORIUCHI H, TOHSAKI A. Prog Part Nucl Phys, 2015, 82: 78. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2015.01.001.

[14] Phys Lett B, 2019, 793: 130.

[15] MANNA S, RANA T K, BHATTACHARYA C, et al. Eur Phys J A.

[16] ZHOU B, FUNAKI Y, HORIUCHI H, et al. Nature Communications, 2023, 14(1): 8206. https://doi.org/10.1038/s41467-023-43816-9.

[17] TOHSAKI A, HORIUCHI H, SCHUCK P, et al. Phys Rev Lett, 2001, 87: 192501.

[18] FUNAKI Y, YAMADA T, HORIUCHI H, et al. Phys Rev Lett, 2008, 101: 082502.

[19] KOKALOVA T, ITAGAKI N, OERTZEN W V, et al. Phys Rev Lett, 2006, 96(19): 192502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.192502.

[20] SMITH R, BISHOP J, HIRST J, et al. SciPost Phys Proc, 2020: 30. DOI: 10.21468/SciPostPhysProc.3.030.

[21] FUNAKI Y, YAMADA T, TOHSAKI A, et al. Phys Rev C, 2010, 82: 024312.

[22] TILLEY D, WELLER H, CHEVES C. Nucl Phys A, 1993, 564(1): 1. DOI: https://doi.org/10.1016/0375-9474(93)90073-7.

[23] LI K C W, NEVELING R, ADSLEY P, et al. Phys Rev C, 2017, 95 (3): 031302. DOI: 10.1103/PhysRevC.95.031302.

[24] BARBUI M, HAGEL K, GAUTHIER J, et al. Phys Rev C, 2018, 98: 044601. DOI: 10.1103/PhysRevC.98.044601.

[25] BISHOP J, KOKALOVA T, FREER M, et al. Phys Rev C, 2019, 100: 034320. DOI: 10.1103/PhysRevC.100.034320.

[26] CHEVALLIER P, SCHEIBLING F, GOLDRING G, et al. Phys Rev, 1967, 160: 827. DOI: 10.1103/PhysRev.160.827.

[27] SOYLU A, FREER M, ASHWOOD N I, et al. Phys Rev C, 2012, 86: 057601. DOI: 10.1103/PhysRevC.86.057601.

[28] CURTIS N, ALMARAZ-CALDERON S, APRAHAMIAN A, et al. Phys Rev C, 2013, 88: 064309. DOI: 10.1103/PhysRevC.88.064309.

[29] FREER M, CLARKE N M, CURTIS N, et al. Phys Rev C, 1995, 51: 1682. DOI: 10.1103/PhysRevC.51.1682.

[30] FREER M, NICOLI M P, SINGER S M, et al. Phys Rev C, 2004, 70: 064311. DOI: 10.1103/PhysRevC.70.064311.

[31] CURTIS N, ALMARAZ-CALDERON S, APRAHAMIAN A, et al. Phys Rev C, 2016, 94: 034313. DOI: 10.1103/PhysRevC.94.034313.

[32] CHEN J, YE Y, MA K, et al. Science Bulletin, 2023, 68(11): 1119. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095927323002852. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.04.031.

[33] YANG B, YE Y L, FENG J, et al. Phys Rev C, 2019, 99: 064315. DOI: 10.1103/PhysRevC.99.064315.

[34] CURTIS N, CAUSSYN D D, FLETCHER N R, et al. Phys Rev C, 2001, 64: 044604. DOI: 10.1103/PhysRevC.64.044604.

[35] FENG J, YE Y, YANG B, et al. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2018, 62(1): 12011. https://doi.org/10.1007/s11433-018-9258-7.

[36] WANG D X, YE Y L, LIN C J, et al. Chin Phys C, 2023, 47(1): 014001. https://dx.doi.org/10.1088/1674-1137/ac9e9a.

[37] TANABASHI M, HAGIWARA K, HIKASA K, et al. Phys Rev D, 2018, 98: 030001. DOI: 10.1103/PhysRevD.98.030001.

[38] LI J, YE Y L, LI Z H, et al. Phys Rev C, 2017, 95: 021303. DOI: 10.1103/PhysRevC.95.021303.

[39] LIU Y, YE Y L, LOU J L, et al. Phys Rev Lett, 2020, 124: 192501. DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.192501.

[40] HAN J X, LIU Y, YE Y L, et al. Phys Rev C, 2022, 105: 044302. DOI: 10.1103/PhysRevC.105.044302.

[41] OHKUBO S, HIRABAYASHI Y. Phys Lett B, 2010, 684(2): 127. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physletb.2009.12.066.

[42] FUNAKI Y, YAMADA T, HORIUCHI H, et al. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 436(1): 012004. https://dx.doi.org/10.1088

/1742-6596/436/1/012004.

[43] TAKAHASHI J, YAMANAKA Y, OHKUBO S. Prog Theor Exp Phys, 2020, 2020(9). DOI: 10.1093/ptep/ptaa117.

CNPC2023 Searching for possible Bose–Einstein condensate states in ^{16}O via its 4-α decay

Jiahao Chen[1], Yanlin Ye[1], Kai Ma[1], Jiaxing Han[1], Dongxi Wang[1], Chengjian Lin[2, 3], Huiming Jia[2], Lei Yang[2], Gen Li[1], Lisheng Yang[1], Ziyao Hu[1], Zhiwei Tan[1], Kang Wei[1], Weiliang Pu[1], Ying Chen[1], Jianling Lou[1], Xiaofei Yang[1], Qite Li[1], Zaihong Yang[1], Tianpeng Luo[2], Dahu Huang[2, 3], Shanhao Zhong[2, 3], Zhihuan Li[1], Jinyan Xu[1]

(*1. School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;*
2. Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;
3. College of Physics and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: Recently, an inelastic scattering experiment of ^{16}O + ^{12}C was performed at the Beijing Tandem Accelerator Nuclear Physics National of China Institute of Atomic Energy. New evidence for the existence of Bose-Einstein condensation state of ^{16}O has been obtained. Employing a series of double-sided-silicon-strip-based telescopes, this experiment achieved accurate particle identification and coincidence measurement of 4-α in the decay of ^{16}O for the first time. Based on this, high-resolution reaction Q-value spectra was obtained and clear 4-α resonance states were reconstructed. In the vicinity of the 4-α separation threshold, 4 highly significant (3 of them above 5σ) resonance states were observed, which decay to the characteristic pattern of ^{12}C(Hoyle state) + α, consistent with the predicted Hoyle-BEC structure and its rotating band features. The observation results will promote further theoretical research, and more measurements are needed for these resonance states in experiments.

Key words: Cluster structure; Hoyle-like states; ^{16}O resonances; High excitation

---

Received date: 06 Feb. 2024; **Revised date:** 06 Feb. 2024

Foundation item: the National Key Research and Development Program of China (2023YFA1606403, 2023YFE0101600 and 2022YFA1602302); the National Natural Science Foundation of China (12235020, 12027809, 11961141003, U1967201 and U2167204); the Continuous Basic Scientific Research Project (WDJC-2019–13); the Leading Innovation Project (LC192209000701 and LC202309000201).

Corresponding author: Yanlin Ye, E-mail: yeyl@pku.edu.cn